第 40 卷　第 5 期
2023 年 10 月

应　用　力　学　学　报
Chinese Journal of Applied Mechanics

Vol. 40 No. 5
Oct. 2023

文章编号:1000-4939(2023)05-1034-09

仿生结构陶瓷金属复合板抗冲击性能数值研究

刘亚洵,梅海,刘齐文,刘立胜

(武汉理工大学新材料力学理论与应用湖北省重点实验室,430070 武汉)

摘　要:复杂组合形式的仿生结构往往具有比单一结构更为优异的性能,为了探索仿生结构陶瓷金属复合板的抗冲击性能,建立了陶瓷金属复合板模型,考虑了砖砌式与龟甲式仿生结构,分别模拟了传统陶瓷金属复合板与仿生结构陶瓷金属复合板受弹体高速冲击的过程。通过对比侵彻各结构复合板后的弹体残余速度,得到了仿生结构陶瓷金属复合板在抗冲击性能上要优于传统陶瓷金属复合板的结论,并进一步通过对比分析了侵彻过程中的弹体剩余速度、陶瓷板损伤情况以及各层板能量损耗结果,分析结果表明:仿生结构较传统结构有局部更为严重的裂纹损伤,并且底层陶瓷板具有更大的陶瓷损伤锥角;仿生结构较传统结构的各层板耗散了更多的能量并且延长了弹体的有效侵彻时间;黏接层能够进一步抑制仿生结构的裂纹扩展和损伤范围。

关键词:陶瓷金属复合板;仿生结构;抗弹性能;陶瓷破碎锥

中图分类号:O347.3　　**文献标志码**:A　　**DOI**:10.11776/j.issn.1000-4939.2023.05.008

Numerical study on impact resistance of bionic structure metal composite plate

LIU Yaxun, MEI Hai, LIU Qiwen, LIU Lisheng

(Hubei Key Laboratory of Theory and Application of Advanced Materials Mechanics, Wuhan University of Technology, 430070 Wuhan, China)

Abstract: Bionic structure with complex combination form tends to have more excellent performance than single structure. In order to explore the impact resistance of bionic structure ceramic/metal composite plate, ceramic metal composite plate model is presented in this paper. Considering the brick type and tortoise shell type bionic structure, then the process of high-speed impact of the composite armor with different structures is simulated. By comparing the residual velocity of the projectile of composite armor, it is found that the impact resistance of the bionic structure ceramic-metal composite armor is better than that of the traditional ceramic-metal composite armor. We analyze the residual velocity of projectile, the damage of ceramic plates and the energy absorption of each layer in the process of penetration. Results show that the bionic structure has more severe local crack damage and the bottom ceramic plate has a larger ceramic damage cone angle than the traditional structure. The biomimetic structure dissipates more energy than the traditional structure and extends the effective penetration time of the projectile, and adhesive layer can fur-

收稿日期: 2022-01-05　　**修回日期**:2022-07-20

基金项目:国家自然科学基金资助项目(No. 11972267;11802214);中央高校基本科研业务资助项目(No. 2020Ⅲ031GX)

通信作者:刘立胜,教授。E-mail:liulish@whut.edu.cn

引用格式:刘亚洵,梅海,刘齐文,等. 仿生结构陶瓷金属复合板抗冲击性能数值研究[J]. 应用力学学报,2023,40(5):1034-1042.
LIU Yaxun, MEI Hai, LIU Qiwen, et al. Numerical study on impact resistance of bionic structure metal composite plate[J]. Chinese journal of applied mechanics, 2023, 40(5):1034-1042.

ther restrain the crack growth and damage range of the biomimetic structure.

Key words: ceramic/metal armor plates; bionic structure; resistance to elasticity; ceramic crushing cone

当今世界国防科技迅速发展,各国对装甲的防护性能提出了更高的要求,其中包括抗冲击性能[1-4],但在提高防护性能的过程中往往会伴随着装甲重量的增加,很多时候会限制装甲的战术性能发挥。而具有较轻质量和优异防护性能的复合装甲[5]克服了传统装甲的瓶颈,开始受到广泛的关注,并逐渐代替了密度较大的纯金属装甲。陶瓷金属复合装甲在充分发挥陶瓷轻质量、高强度特性[6]的同时,还能够发挥金属背板的缓冲延展作用,两者相结合从而提升了装甲的抗冲击性能。

近些年来,经过对传统复合装甲在解析方法[7-8]、功能梯度[9]、计算模型[10-11]等方面的研究,在材料部分,其抗冲击性能已鲜有大的提升。学者们试图从结构上寻找突破,并在对自然界中骨骼[12]等生物材料[13-14]的认识和研究中发现,自然界的生物材料几乎都是简单组分、复杂结构,并且已经能够适应各种复杂环境,这也说明通过简单材料组分的复杂组合,能够获得比单一材料更加优异的性能[15],如高强度[16]、高韧性[17]以及抗破坏性能[18]。受自然界中生物材料特殊结构的启发,在陶瓷金属复合材料的设计和研究中,引入了仿生结构[19],该结构主要特征如下:①简单的材料组成、复杂的结构组合方式;②弱界面层使得裂纹在弱界面层中反复偏折,从而消耗大量的断裂能。在仿生设计中,在不改变原有材料性质、质量等前提下,通过不同复杂结构的组合与协同作用,就能够对整体的性能进一步优化,为轻质防护材料的性能优化设计提供了一种新的思路。

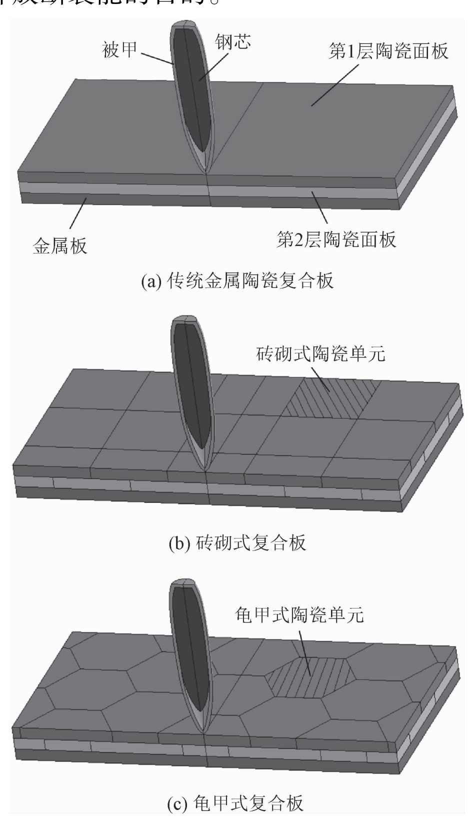
目前在仿生学方面已经开展了一系列研究。在生物材料方面,ACHRAI 等[20]研究了乌龟背壳的结构特点,发现背壳顶部已形成可承受各种高压力的表皮装甲,并展示了外壳的微观特征对各种宏观力学响应的影响。朱卓等[21]通过研究生物软组织的力学性能发现多种材料的并联复合软组织结构模型更符合实际应力特性,整个穿刺过程主导特性依次为"超弹性-黏弹性-超弹性"。李睿等[22]研究了脊椎生物关节在不同频率振动载荷下的变形、应力分布和体液流动情况,发现不同频率振动载荷下,应力分配、体液流量均呈现与振动载荷不同的周期性波动变化。在仿生学程序设计方面,KARAMBELAS 等[23]开发出了在宏观形式下复杂微结构的程序,并构造了氮化硅-碳化硼陶瓷结构,通过计算结果发现该结构具有与生物材料相当的抗损伤性和硬度。YIN 等[24]提出了一种夹层玻璃,并发现类似珍珠的玻璃在保持高强度和刚度的同时,抗冲击性能上也要优于夹胶玻璃和钢化玻璃。BARTHELAT 等[25]将基本力学模型运用到交错复合的仿生结构优化设计方案中,以满足任何期望的刚度、强度和能量吸收组合。程华等[26]提出了一种新型蜂窝状钢管约束混凝土遮弹层结构,并通过仿真计算发现钢管混凝土短构件比同强度的素混凝土构件的抗侵彻能力更强。由此可见,仿生结构具有在相同材料条件下提高整体抗冲击性能的潜力,这也为提升防护装甲抗冲击性能提供了思路与方法,但目前的仿生结构研究大多是在静载与低速冲击条件下进行的,对于受高速弹体冲击条件下内部各组分受到的力学响应状况并没有较为系统的分析,有待进一步探究。

为了对在高速侵彻条件下的仿生结构防护装甲进行进一步优化,本研究对仿生结构中砖砌式、龟甲式结构的抗弹性能进行了系统研究,利用LS-DYNA有限元软件,对不同结构形式的复合板受弹体冲击的高速侵彻过程进行数值仿真。对比分析仿生结构复合板与传统形式陶瓷金属复合板的弹体侵彻过程、速度变化、损伤特征、能量损耗等动力响应结果。综合以上动力响应结果,得出仿生结构复合板较传统形式复合板具有更为优异的抗侵彻性能,并为具有更高抗冲击性能的仿生结构复合板设计提供借鉴意义。

1　仿生结构陶瓷金属复合板模型

根据特征不同,仿生结构主要包含 3 类[27]:一是生物结构内层包含韧性聚合物(如胶原纤维)以提高灵活性;二是通过柔韧聚合物连接脆而厚的基体材料(如生物的骨瓦片);三是坚硬钢板之间的缝合线提供的灵活性,其具有层合黏接的特性,如龟甲背壳,这种分段保护的系统即使其中一个保护部分被破坏或丢失,其余结构的功能不会受到损害。这 3 种设计思路均从自然界生物材料特性中得到启发,首先是简单组分的复杂结构,其次引入了弱界面

层的概念,当裂纹到达弱界面层时,通过反复偏折,达到释放断裂能的目的。



(a) 传统金属陶瓷复合板
(b) 砖砌式复合板
(c) 龟甲式复合板

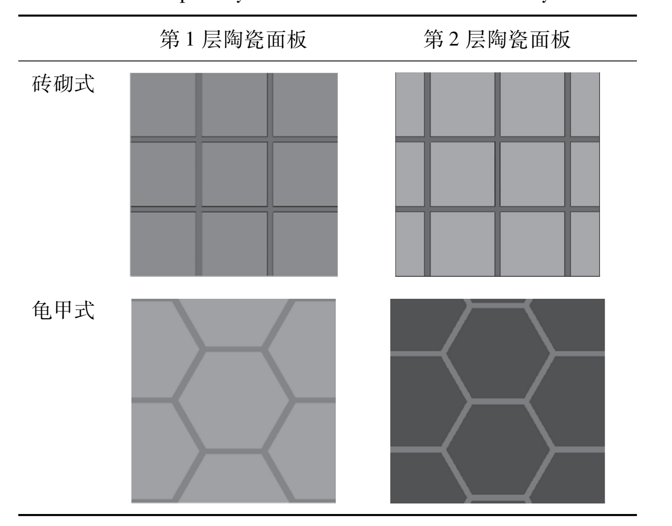
图1 复合板模型

Fig. 1 Composite plate model

复合板的结构形式主要分为3大类(图1):第一类为无限大的传统单块陶瓷双层板结构,用作基本结构进行对照;第二与第三类分别为砖砌式和龟甲式,砖砌式即为立方体式的砖块结构,单块表面呈正方形,龟甲式为蜂窝状的形式,表面呈正六边形。二层板的排列方式均为表1中的错层形式。

表1 不同陶瓷层错层形式

Tab. 1 Split-layer forms of different ceramic layer

	第1层陶瓷面板	第2层陶瓷面板
砖砌式		
龟甲式		

陶瓷金属复合装甲在提高装甲抗冲击性能的同时,还要保证装甲的重量在一定范围内不增加。通常评价陶瓷金属复合装甲这一性能的指标是面密度。面密度是指在指定厚度时,装甲材料单位面积的质量。

仿生层状陶瓷金属复合装甲的面密度计算公式为

$$\rho_{\mathrm{A}} = \sum_{i=1}^{n} h_i \rho_i + \sum_{j=1}^{m} h_j \rho_j \tag{1}$$

其中:ρ_{A} 为陶瓷金属复合装甲的面密度;ρ_i 是单层陶瓷面板的体密度;ρ_j 是单层金属黏接层与金属背板的体密度;h_i 和 h_j 分别为陶瓷面板与金属板的厚度。

单层陶瓷面板的密度计算公式为

$$\rho_i = \omega\rho_{\mathrm{C}} + (1-\omega)\rho_{\mathrm{B}} \tag{2}$$

其中:ω 为单层陶瓷面板中陶瓷材料的体积分数;ρ_{C} 为陶瓷材料的密度;ρ_{B} 为黏接材料铝合金的密度。

在相同的冲击条件下,当面密度保持一定时,抗冲击性能越高,装甲的综合性能就越好。本研究建立的复合板模型在无黏接层类别下的面密度均为6.863 g/cm^2,有黏接层类别下,砖砌式、龟甲式复合板的面密度分别为7.306、7.287 g/cm^2。

对于陶瓷金属复合板的基本几何参数,无黏接层复合板的总厚度为13.5 mm,有黏接层的为15.5 mm,其中金属背板厚度为4.5 mm,砖砌式陶瓷单元边长为30 mm,龟甲式陶瓷单元边长为18 mm。具有黏接层的仿生结构,其陶瓷面板由两个单层陶瓷板与两层铝合金黏接层交替黏接而成,参考相关仿生结构的研究[22],初步选取层间黏接层厚度为1 mm,单层陶瓷面板基体单元间的黏接层厚度为2 mm。

本研究的陶瓷板材料为氧化铝陶瓷[28],采用JH2本构模型,该模型适用于陶瓷类等脆性材料在大应力应变条件下的加载,与本研究的陶瓷复合装甲抗冲击性能研究相一致,JH2本构模型中的标准化等效应力可表示为

$$\sigma^* = \sigma_i^* - D(\sigma_i^* - \sigma_f^*) \tag{3}$$

其中:σ_i^* 表示标准化完整强度;σ_f^* 表示标准化断裂强度。

标准化完整强度 σ_i^* 与标准化断裂强度 σ_f^* 分别为

$$\sigma_i^* = A(P^* + T^*)^N(1 + C \cdot \ln\dot{\varepsilon}^*) \tag{4}$$

$$\sigma_f^* = B(P^*)^M(1 + C \cdot \ln\dot{\varepsilon}^*) \tag{5}$$

其中：P^* 为标准化应力；T^* 为标准化拉伸静水压强；$\dot{\varepsilon}^*$ 为参考应变率，A、B、C、M、N 为材料参数。

裂纹的损伤积累为

$$D = \frac{\sum \Delta\varepsilon^{\mathrm{p}}}{\varepsilon_f^{\mathrm{p}}} \tag{6}$$

其中：$\sum \Delta\varepsilon^{\mathrm{p}}$ 表示一个积分循环步的塑性应变；$\varepsilon_f^{\mathrm{p}}$ 表示断裂塑性应变，且

$$\varepsilon_f^{\mathrm{p}} = D_1 (P^* + T^*)^{D_2} \tag{7}$$

其中 D_1 和 D_2 为常量。

金属背板为合金钢[29]，黏接层材料选用铝合金[30]，冲击弹体为 12.7 mm 钢芯穿甲弹[31]，均采用 JC 本构模型，该模型包含的失效准则在动态加载下金属材料的失效与响应问题上表现出较好的适应性，其本构模型中的流动应力为

$$\sigma_y = (A + B\bar{\varepsilon}^N)\left(1 + C\ln\frac{\dot{\bar{\varepsilon}}}{\dot{\bar{\varepsilon}}_0}\right)(1 - T^{*M}) \tag{8}$$

其中：$\bar{\varepsilon}$ 为等效塑性应变；A 为屈服应力；B 和 N 为应变硬化常数；C 为应变率硬化常数；M 为热软化常数；$\dot{\bar{\varepsilon}}_0$ 为参考应变率；$\dot{\bar{\varepsilon}}$ 为应变率；T^* 由温度定义，且

$$T^* = \frac{T - T_0}{T_{\mathrm{m}} - T_0} \tag{9}$$

其中：T_0 为参考温度；T_{m} 为材料的熔化温度。

断裂应变的表达式为

$$\varepsilon^f = (D_1 + D_2 \exp D_3 \sigma^*)(1 + D_4 \ln \dot{\varepsilon})(1 + D_5 T^*) \tag{10}$$

其中 D_1、D_2、D_3、D_4、D_5 为材料参数。

各材料参数如表 2 ~4 所示。

表 2　材料基本参数

Tab. 2　The properties of target materials

材料名称	密度/(g・cm^{-3})	弹性模量/GPa	泊松比
Al_2O_3	3.7	380	0.25
钢板	7.85	202	0.31
钢芯	7.85	200	0.3
被甲	7.92	112	0.3
铝合金	2.7	72	0.33

表 3　Al_2O_3 陶瓷材料 JH2 本构模型参数[28]

Tab. 3　JH2 constitutive model parameter of Al_2O_3 [28]

密度/(g・cm^{-3})	剪切模量/[g・(μs^2・cm)$^{-1}$]	A	B	C	N	M	$\sigma_{\max}^f$
3.70	1.52	0.93	0.31	0.007	0.64	0.6	1.0

HEL/[g・(μs^2・cm)$^{-1}$]	P_{HEL}/[g・(μs^2・cm)$^{-1}$]	$\dot{\varepsilon}$/μs^{-1}	D_1	D_2	K_1/[g・(μs^2・cm)$^{-1}$]	β
0.19	0.014	1×10^{-6}	0.001	1.00	2.31	1.0

表 4　各金属组分材料 JC 本构模型参数

Fig. 4　JC constitutive model parameters of each metal component material

	密度/(g・cm^{-3})	剪切模量/[g・(μs^2・cm)$^{-1}$]	A/[g・(μs^2・cm)$^{-1}$]	B/[g・(μs^2・cm)$^{-1}$]	n	C	$\dot{\varepsilon}$/μs^{-1}	m
铝合金[30]	2.7	0.27	0.001 954	0.000 806	0.25	0.013	10^{-6}	0
钢板[29]	7.85	0.77	0.007 92	0.005 1	0.26	0.014	10^{-6}	1.03
钢芯[31]	7.85	0.77	0.015 4	0.004 77	0.16	0.00	10^{-6}	1.0
被甲[31]	7.92	0.43	0.003	0.002 75	0.15	0.022	10^{-6}	1.0

	t_0/K	t_{m}/ K	D_1	弹性波速/(cm・μs^{-1})	S_1	γ	α
铝合金[30]	298	933.52	0.033 6	0.394	1.493	1.99	0.00
E304 钢[29]	294	179 3	0.8	0.456 9	1.49	2.17	0.46
钢芯[31]	293	176 3	1.4	0.456 9	1.33	2.17	0.46
被甲[31]	293	181 1	0.5	0.443 0	1.33	0.47	2.47

弹体冲击陶瓷金属复合板的有限元模型如图 2 所示，整个面板的尺寸为 15 cm×15 cm，复合板模型均采用 1/4 模型，弹体、陶瓷板、钢背板采用 solid164 实体单元，陶瓷与黏接层间采用共节点形式处

理[32]。复合板四周施加固定约束,对称面分别施加法向约束,对于无限大复合板,需要在外围添加无反射边界条件用以满足无限大靶板形式的尺寸条件。考虑到弹体高速冲击下复合板的单元失效问题,弹体与板、板中各组件间均采用“Eroding Surface to Surface”接触,该种接触算法与传统模型的有效性已在文献[29-30]中得到证明。冲击弹体模型采用实际的12.7 mm穿甲弹的弹体尺寸,冲击速度为高速800 m/s不变。建模时通过弹、靶网格单元尺寸的合理选取以及接触卡片的设置来克服高速冲击下易出现的计算不收敛与网格畸变问题,尤其是仿生结构的网格尺寸,这样能够在保证计算精度的同时,一定程度上也减少了计算时间,充分利用了计算资源。弹体部分的网格尺寸为0.12 cm,复合板部分的网格尺寸为0.06 cm,模型共240 041个单元。

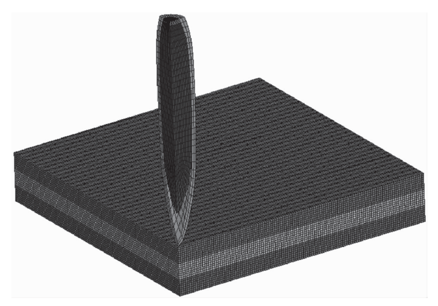


图2　陶瓷金属复合板有限元模型

Fig.2　Finite element model of ceramic metal composite plate

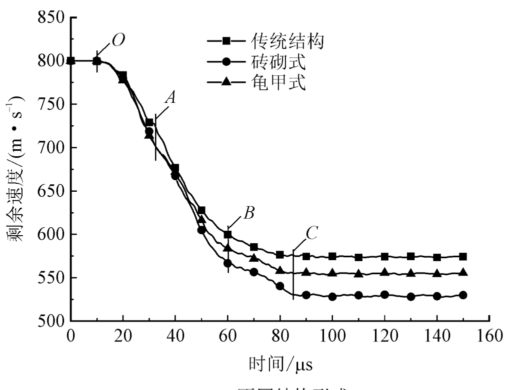
2　冲击响应结果与分析

2.1　弹体冲击速度变化情况

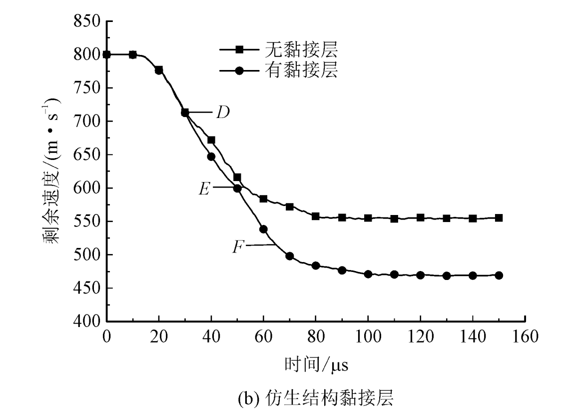
本研究在保持面密度以及陶瓷板厚度比相同的条件下进行了多组不同结构复合板的数值模拟,发现仿生结构复合板的弹芯剩余速度具有相同的变化规律,下面通过具有代表性的3组计算结果进行抗侵彻机理分析。

弹体在不同结构复合板下的速度历程曲线如图3(a)所示。由于被甲先于弹芯对陶瓷面板进行侵彻,弹芯在10 μs才开始侵彻陶瓷板,对应于O点,整个侵彻过程总体分为OA、AB、BC三段,OA段为弹芯侵彻一层陶瓷板的阶段,该阶段也是弹芯速度下降最快的过程,弹芯侵彻一层陶瓷板后,在一二层陶瓷板界面处弹芯侵彻会有短暂的空隙,在速度曲线中由一个小台阶的形式体现,即33 μs处的A点,不同结构形式的台阶点有0~5 μs的差距;AB段为弹芯侵彻二层陶瓷板的阶段,B点为60 μs处,AB后半段为二层陶瓷部分与背板共同起抗侵彻作用;BC段为弹芯单独侵彻背板阶段,三者差距进一步增大,最终速度值趋于稳定,残余速度大小分别为:传统结构>龟甲式>砖砌式,这也说明了仿生结构复合板较传统形式复合板在整体上具有更为优异的抗侵彻性能。

图3(b)中考虑了黏接层对仿生结构中龟甲式复合板的影响,增加黏接层的仿生结构在每一层结构中均形成了局部的陶瓷块与延性背板的组合,并且陶瓷块四周由黏接层包裹。由曲线可知在33 μs后,二者曲线便出现分岔,无黏接层复合板在曲线中的D(33 μs)、E(52 μs)两点速度的变化速率有明显的下降,分别对应于弹体在一二层陶瓷板界面处和二层陶瓷板与背板界面处,分段侵彻现象明显;而添加黏接层后则使得弹体侵彻到背板之前,剩余速度的下降速率始终维持在高水平范围内,直到曲线中F点的63 μs时才开始减小,最终的残余速度为470 m/s,较无黏接层形式下降了86 m/s,说明仿生结构复合板在添加黏接层后延长了有效抗侵彻时间进而提升了抗冲击性能。



(a) 不同结构形式



(b) 仿生结构黏接层

图3　弹芯速度时间历程曲线

Fig.3　Time history curve of bullet velocity

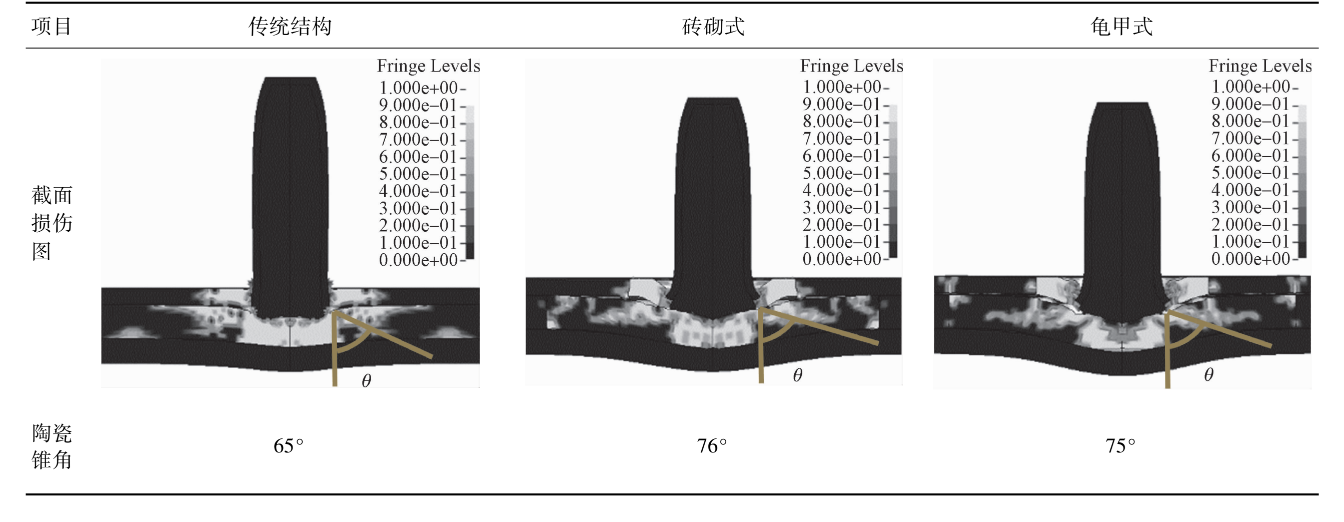
2.2　陶瓷板裂纹扩展及半锥角

图 4 为传统结构与仿生结构陶瓷面板的损伤图,侵彻开始时,陶瓷面板与弹体的接触区域的应力迅速增大,面板中心产生冲击波,该冲击波为压缩波,一层面板内的压缩应力大于陶瓷的压缩强度,因此陶瓷面板中央区域会迅速碎裂破坏,如图 4(a)所示。由于应力波等复杂波系的进一步相互作用,在陶瓷面板整体产生一定的形变之后,面板内的拉伸应力大于陶瓷的抗拉强度,开始出现径向裂纹的扩展,在径向裂纹扩展到一定程度后,分支裂纹相互贯通产生环向裂纹,裂纹整体呈发散状。仿生结构的面板损伤情况如图 4(b) ~4(c)所示,仿生结构中心单元块的损伤裂纹在相邻单元界面处的扩展受到阻碍,应力波在中心单元块区域会发生多次反射与叠加,因此从图 4 中可明显看出中心部分仿生结构的损伤程度高于传统形式的陶瓷面板,单元块内同样发生径向与环向裂纹的扩展,整体损伤范围大幅度减小。

不同结构下二层陶瓷锥角损伤情况如表 5 所示,由于二层板的结构形式,一层板的破碎会使二层板上边界部分产生压缩损伤,从二层板刚形成的陶瓷锥角结果来看传统结构均小于两种仿生结构,进一步的侵彻会在锥角内的区域充分发生损伤破坏,在相同厚度下,更大的陶瓷锥角会形成更大的破碎区域,耗散更多的断裂能,从而更有效地抵抗弹体的冲击。

表 5　二层陶瓷板的破碎锥角

Tab. 5　Crushing cone angle of 2nd ceramic plate



项目	传统结构	砖砌式	龟甲式
截面损伤图			
陶瓷锥角	65°	76°	75°

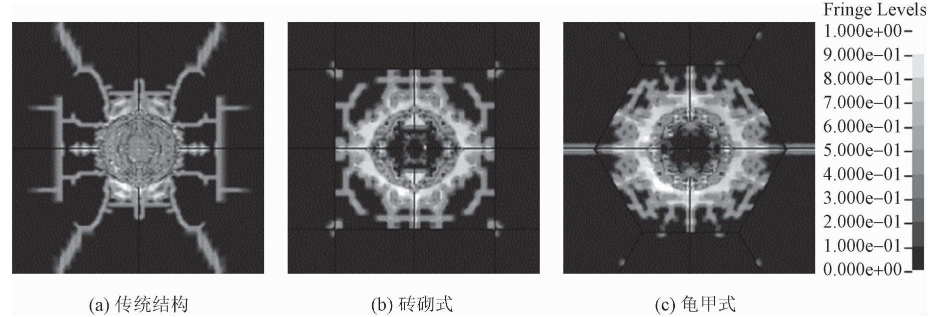


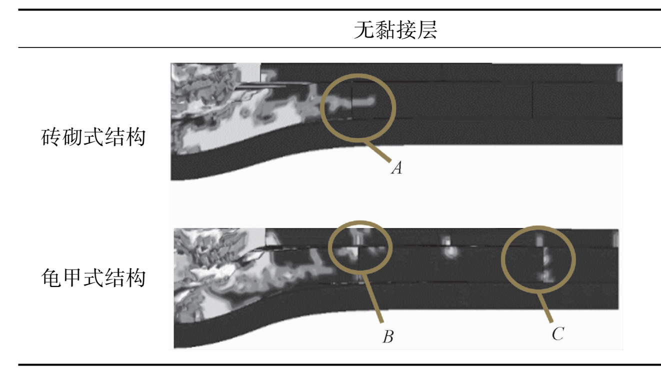
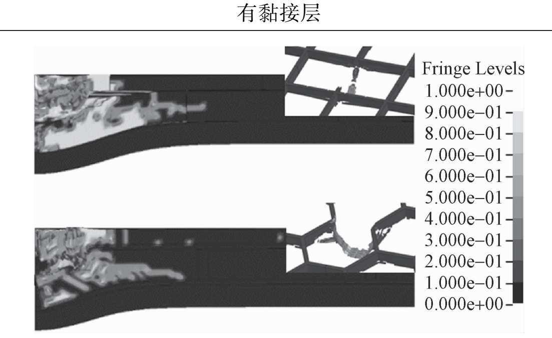
图 4　陶瓷面板损伤图

Fig. 4　Ceramic plate damage

搭接式的仿生结构通过局部的严重损伤从而提高抗侵彻性能,但会对相邻单元产生不同程度的损伤,一二层陶瓷板中均有所体现,如表 6 中的 A、B、C 处,添加黏接层后可以看到对应界面处的损伤得到了明显改善,当弹体贯穿二层陶瓷板中的黏接层时,中心的条形黏接层发生严重拉伸破坏,相邻区域的底部同样会因拉伸失效而产生小部分剥离。砖砌式复合板裂纹的径向延伸范围由无黏接层的 3.02 cm 减小到了 2.77 cm,龟甲式无黏接层单元块界面处的损伤较砖砌式范围更大,而层间与单元间的黏接层则消除了这一不利因素,不仅使得损伤在局部发生,还有效抑制了裂纹的扩展和损伤范围。

表6 黏接层对仿生结构陶瓷板的损伤影响

Tab. 6 Influence of adhesive layer on damage of bionic ceramic plate

	无黏接层	有黏接层
砖砌式结构		
龟甲式结构		

2.3 能量损伤特性

不同结构陶瓷板受冲击时的总能量变化如图5所示，总能量由板的内能与动能两部分组成，内能包括了组件的形变能以及由摩擦产生的热能等能量。在一层和二层陶瓷板的能量峰值以及侵彻能量稳定后的内能部分，传统结构均小于仿生结构，这也与前一小节中陶瓷板的局部损伤程度相对应，说明仿生结构中更高程度的局部裂纹损伤会加大陶瓷板抗侵彻时的能量耗散。从各结构二层陶瓷的能量峰值上看，仿生结构除了能量耗散的提高，峰值出现的时间点相较于传统结构也出现了不同程度上的延后，如曲线中 A 点与 B、C 点，时间的先后顺序为传统形式、龟甲式、砖砌式，延长了有效抗侵彻时间，从而提高了陶瓷板阶段的抗侵彻性能。

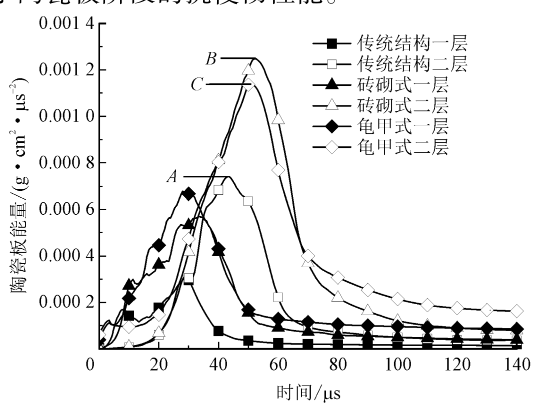


图5 各层陶瓷板的能量时间历程曲线

Fig. 5 Energy-time curves of ceramic plates

不同结构下的背板总能量变化如图6所示，相较于陶瓷板，背板主要起能量吸收与缓冲作用，整体能量峰值提升了4~6倍。在通过背板时，弹体的剩余速度若更小，破坏力相应减弱，作用于背板的有效时间随之延长，使背板的形变程度增大，从而使背板的能量吸收能力增强。当背板出现拉伸损伤后，缓冲性能开始降低，增加速率减小直至0，即达到能量峰值，此时背板发生严重的拉伸损伤并破坏，弹体开始贯穿背板，背板动能降低，总能量小幅减小至平缓，此时稳定的值主要为背板的内能值。对比三者的背板能量变化曲线可知，各结构背板能量峰值的时间点顺序与二层陶瓷一致，先后顺序为传统结构、龟甲式、砖砌式，如图6中 A、B、C 点。背板的内能部分，两种仿生结构分别是传统结构的1.41倍和1.63倍，在能量耗散上有了进一步提升。此外，背板的形变程度如表7中的截面损伤图所示，三者（传统结构、龟甲式、砖砌式）背板中心的凸起高度分别为7.25、7.46、7.65 cm，与能量耗散变化相一致，能量耗散越多，凸起高度越高。

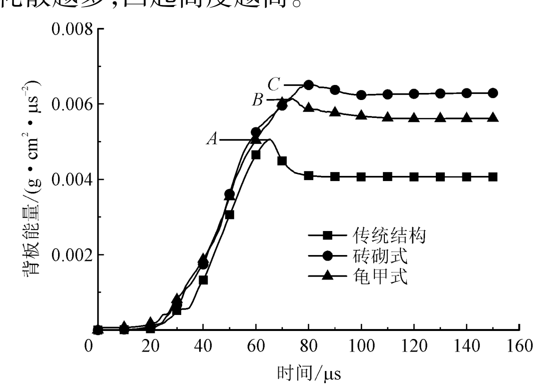
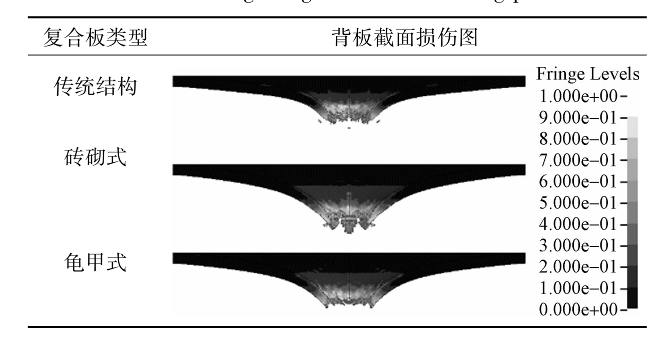


图6 背板能量时间历程曲线

Fig. 6 Energy-time curves of back plates

表7 钢背板截面损伤图

Tab. 7 Damage diagram of steel backing plates

复合板类型	背板截面损伤图
传统结构	
砖砌式	
龟甲式	

3 结　论

本研究通过 LS-DYNA 软件对传统陶瓷金属复合板和仿生结构陶瓷复合板进行了数值模拟，得出了在相同面密度条件下，仿生结构复合板在抗侵彻性能上要优于传统形式的陶瓷金属复合板的结论，并且在仿生结构形式上具有进一步提升的潜力。最后通过数值模拟结果，在弹体速度历程曲线、陶瓷部分损伤特征以及各层板的能量耗散曲线方面对两者的抗侵彻性能进行了综合分析，得出了以下结论。

1）模拟并分析了弹体对各复合板在不同阶段的侵彻形式及特征，并得到了弹体最终的残余速度值：传统结构 > 龟甲式 > 砖砌式。

2）通过陶瓷板的损伤云图分析得到了仿生结构较传统结构有局部更为严重的裂纹损伤，底层陶瓷板具有更大的陶瓷损伤锥角，并且黏接层能够进一步抑制仿生结构的裂纹扩展和损伤范围。

3）将各结构陶瓷的损伤对比陶瓷部分的能量变化曲线，得出了各层陶瓷部分，仿生结构较传统结构耗散了更多的能量并且延长了弹体的有效侵彻时间，最后在背板的内能部分，两种仿生结构的内能分别是传统结构的 1.41 倍和 1.63 倍。

参考文献：

[1] RAJENDRAN A M. Modeling the impact behavior of AD85 ceramic under multiaxial loading[J]. International journal of impact engineering, 1994, 15(6): 749-768.

[2] LUNDBERG P, RENSTRÖM R, LUNDBERG B. Impact of metallic projectiles on ceramic targets: transition between interface defeat and penetration[J]. International journal of impact engineering, 2000, 24(3): 259-275.

[3] 高玉波. TiB_2-B_4C 复合材料动态力学性能及抗侵彻机理研究[D]. 哈尔滨：哈尔滨工业大学，2016.

[4] ZINSZNER J L, FORQUIN P, ROSSIQUET G. Experimental and numerical analysis of the dynamic fragmentation in a SiC ceramic under impact[J]. International journal of impact engineering, 2015, 76: 9-19.

[5] 肖毅华，吴和成. 弹体形状对陶瓷/聚脲复合板抗侵彻性能影响的数值模拟[J]. 应用力学学报，2021，38(2)：750-755.
XIAO Yihua, WU Hecheng. Numerical simulation of effects of projectile shape on ballistic resistance of ceramic/polyurea composite plates[J]. Chinese journal of applied mechanics, 2021, 38(2): 750-755(in Chinese).

[6] 侯海量，朱锡，阚于龙. 陶瓷材料抗冲击响应特性研究进展[J]. 兵工学报，2008，29(1)：94-99.
HOU Hailiang, ZHU Xi, KAN Yulong. Advance of dynamic behavior of ceramic material under the impact of projectile[J]. Acta armamentarii, 2008, 29(1): 94-99(in Chinese).

[7] CHOCRON BENLOULO I S, SÁNCHEZ-GÁLVEZ V. A new analytical model to simulate impact onto ceramic/composite armors[J]. International journal of impact engineering, 1998, 21(6): 461-471.

[8] CHI R Q, SERJOUEI A, SRIDHAR I, et al. Ballistic impact on bi-layer alumina/aluminium armor: a semi-analytical approach[J]. International journal of impact engineering, 2013, 52: 37-46.

[9] EGHTESAD A, SHAFIEI A R, MAHZOON M. Study of dynamic behavior of ceramic-metal FGM under high velocity impact conditions using CSPM method[J]. Applied mathematical modelling, 2012, 36(6): 2724-2738.

[10] CHAKRABORTY S, ISLAM M R I, SHAW A, et al. A computational framework for modelling impact induced damage in ceramic and ceramic-metal composite structures[J]. Composite structures, 2017, 164: 263-276.

[11] 过超强，赵桂平. 复合装甲抗侵彻性能的数值分析[J]. 应用力学学报，2013，30(1)：96-99.
GUO Chaoqiang, ZHAO Guiping. Numerical simulation of ballistic impact on composite armours[J]. Chinese journal of applied mechanics, 2013, 30(1): 96-99(in Chinese).

[12] YAHYAZADEHFAR M, IVANCIK J, MAJD H, et al. On the mechanics of fatigue and fracture in teeth[J]. Applied mechanics reviews, 2014, 66(3): 030803.

[13] BARTHELAT F, YIN Z, BUEHLER M J. Structure and mechanics of interfaces in biological materials[J]. Nature reviews materials, 2016, 1(4): 16007.

[14] RUDYKH S, ORTIZ C, BOYCE M C. Flexibility and protection by design: imbricated hybrid microstructures of bio-inspired armor[J]. Soft matter, 2015, 11(13): 2547-2554.

[15] LUZ G M, MANO J F. Biomimetic design of materials and biomaterials inspired by the structure of nacre[J]. Philosophical transactions of the royal society A: Mathematical, physical and engineering sciences, 2009, 367(1893): 1587-1605.

[16] 赵骞. Al-Ti-B4C 体系仿生层状抗冲击材料设计与制备研究[D]. 长春：吉林大学，2016.

[17] MUNCH E, LAUNEY M E, ALSEM D H, et al. Tough, bio-inspired hybrid materials[J]. Science, 2008, 322(5907): 1516-1520.

[18] ORTIZ C, BOYCE M C. Bioinspired structural materials[J]. Science, 2008, 319(5866): 1053-1054.

[19] PRO J W, BARTHELAT F. The fracture mechanics of biological and bioinspired materials[J]. MRS bulletin, 2019, 44(1): 46-52.

[20] ACHRAI B, WAGNER H D. The turtle carapace as an optimized multi-scale biological composite armor — a review[J]. Journal of the mechanical behavior of biomedical materials, 2017, 73: 50-67.

[21] 朱卓，李宏胜. 虚拟手术中人体软组织超粘弹性建模及穿刺仿真[J]. 应用力学学报，2019，36(2)：304-309.
ZHU Zhuo, LI Hongsheng. The human soft tissue hyper viscoelastic biological model and puncture simulation in virtual surgery[J]. Chinese journal of applied mechanics, 2019, 36(2): 304-309(in

Chinese).

[22] 李睿,罗跃纲,郭立新,等.基于多孔弹性模型的脊椎关节生物力学特性和体液流动特性研究[J].应用力学学报,2020,37(1):225-230.
LI Rui,LUO Yuegang,GUO Lixin,et al. Biomechanical and fluid flowing characteristics of lumbar segment predicted by poroelastic model[J]. Chinese journal of applied mechanics,2020,37(1):225-230(in Chinese).

[23] KARAMBELAS G,SANTHANAM S,WING Z N. Strombus gigas inspired biomimetic ceramic composites via SHELL—sequential hierarchical engineered layer lamination[J]. Ceramics international,2013,39(2):1315-1325.

[24] YIN Z,HANNARD F,BARTHELAT F. Impact-resistant nacre-like transparent materials[J]. Science,2019,364(6447):1260-1263.

[25] BARTHELAT F. Designing nacre-like materials for simultaneous stiffness,strength and toughness:optimum materials,composition,microstructure and size[J]. Journal of the mechanics and physics of solids,2014,73:22-37.

[26] 程华,黄宗明,石少卿,等.应用仿生原理设计遮弹层及其抗侵彻数值模拟分析[J].应用力学学报,2005,22(4):593-597.
CHENG Hua,HUANG Zongming,SHI Shaoqing,et al. New-type bursting layer structure biomimetic design and numerical anti-penetration capability simulation[J]. Chinese journal of applied mechanics,2005,22(4):593-597(in Chinese).

[27] CHINTAPALLI R K,MIRKHALAF M,DASTJERDI A K,et al. Fabrication,testing and modeling of a new flexible armor inspired from natural fish scales and osteoderms[J]. Bioinspiration & biomimetics,2014,9(3):036005.

[28] 刘伟兰.三明治结构背板对陶瓷复合装甲的抗弹影响与仿真研究[D].南京:南京航空航天大学,2016.

[29] 王珍.陶瓷/金属复合材料的陶瓷损伤特性研究[D].武汉:武汉理工大学,2012.

[30] 李言语.陶瓷/金属复合靶板抗侵彻数值分析及影响因素研究[D].南宁:广西大学,2013.

[31] 侯二永.陶瓷间隙靶抗12.7 mm穿甲燃烧弹机理及性能研究[D].长沙:国防科学技术大学,2008.

[32] 程毅,刘军,郑雨晴,等.钢板混凝土复合靶抗贯穿性能的理论与数值分析[J].应用力学学报,2020,37(4):1441-1449.
CHENG Yi,LIU Jun,ZHENG Yuqing,et al. Theoretical and numerical investigation of perforation resistance of steel-concrete composite target[J]. Chinese journal of applied mechanics,2020,37(4):1441-1449(in Chinese).

（编辑　张璐）